
**ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
(ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ)
FIRE SAFETY (TECHNICAL)**

УДК 614.842

DOI 10.48612/ntp/e9ke-at7n-p2t6

**ПОДХОДЫ К ОПТИМИЗАЦИИ НАСОСНЫХ ГРУПП
В ПРОТИВОПОЖАРНОМ ВОДОСНАБЖЕНИИ**

В. Б. БУБНОВ, Д. С. РЕПИН

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,
Российская Федерация, г. Иваново
E-mail: kafppv@mail.ru

В работе представлены результаты исследований разных способов регулирования подачи воды в насосных станциях систем противопожарного водоснабжения. Разработана модель насосной группы различной комплектации для расчета энергетических показателей. Проанализирована эффективность методов регулирования для различных практических случаев. Предложена методика оценки эффективности применения частотного регулирования подачи для насосной группы. Проведена оценка экономии электроэнергии от применения метода частотного регулирования подачи по сравнению с другими способами регулирования.

Разработаны подходы к определению оптимального режима работы насосной группы в зависимости от требуемых параметров (подача, напор), в том числе с учетом технологических ограничений (максимально и минимально допустимые числа оборотов приводных двигателей). Предложен ряд практических мероприятий по сокращению потребления электрической энергии на привод различных насосных групп.

Ключевые слова: противопожарное водоснабжение, насос, энергетическая эффективность, пожаротушение, байпасирование, дросселирование, частотное регулирование, модель, оптимизация.

**APPROACHES TO OPTIMIZING PUMPING GROUPS
IN FIRE-FIGHTING WATER SUPPLY**

V. B. BUBNOV, D. S. REPIN

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education
«Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation
for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,
Russian Federation, Ivanovo
E-mail: kafppv@mail.ru

The paper presents the results of studies of different methods of water supply regulation in pumping stations of fire-fighting water supply systems. A model of a pumping group of various configurations for calculating energy indicators has been developed. The efficiency of regulation methods for various practical cases has been analyzed. A methodology for assessing the efficiency of using frequency regulation of the supply for a pumping group has been proposed. An assessment of energy savings from using the frequency regulation method of the supply in comparison with other regulation methods has been carried out.

Approaches have been developed to determining the optimal operating mode of a pumping group depending on the required parameters (supply, pressure), including taking into account technological limitations (maximum and minimum permissible speeds of drive motors). A number of practical measures have been proposed to reduce the consumption of electrical energy for driving various pumping groups.

Key words: fire water supply, pump, energy efficiency, fire extinguishing, bypass, throttling, frequency regulation, model, optimization.

Введение

Центробежные насосы находят широкое применение в системах водоснабжения, в том числе при подаче воды на пожаротушение [1]. Подача больших объемов воды в системах противопожарного водоснабжения объектов защиты требует значительных затрат электроэнергии. Экономия энергозатрат может быть обеспечена использованием интеллектуальной системы управления, а также обновлением применяемого оборудования.

Обеспечение графика водопотребления $Q(t)$ и необходимых параметров, в том числе для пожаротушения, достигается путем регулирования подачи насосов на объектах защиты. Существует несколько методов изменения параметров насосов (регулирования их работы), среди которых байпасирование и дроссельное регулирование [2]. Эти методы широко применяются на практике, однако имеют низкую энергоэффективность.

Эффективным способом регулирования подачи центробежных насосов с энергетической точки зрения является частотное регулирование, благодаря чему в последние годы он получает значительное распространение. Исследования в области частотного способа регулирования подачи насосов представлены в ряде научных публикаций [3–7]. Анализ работ показывает, что в настоящее время не имеется модели для осуществления оптимальной настройки методом изменения частоты вращения вала и решения экономической задачи для насосных станций в системах водяного пожаротушения. А поскольку данный метод регулирования работы насосов является дорогим, то его применение должно опираться на результаты научно-обоснованных исследований, определение оптимальных частот для электродвигателя насоса, с оценкой возможного экономического эффекта.

Целью работы является разработка подходов к оптимизации насосных групп в противопожарном водоснабжении.

Методология и методы исследования

Для решения задач, поставленных на данном этапе работы, использовались методы математического моделирования, численные исследования. Проведены исследования энергетической эффективности различных методов регулирования подачи насосных групп, выбран и обоснован критерий оптимальности режима их эксплуатации, разработана модель для решения оптимизационной задачи настройки насосной станции.

Основу для проведения исследований составили разработанные нами математические модели и программно-аппаратные комплексы, представленные в работе [8].

Результаты и их обсуждение

Увеличение частоты вращения вала центробежного насоса приводит к возрастанию основных параметров, а именно подачи Q , напора H и мощности N , что наглядно представлено на рис. 1. При данном способе регулирования коэффициент полезного действия может несколько уменьшаться или увеличиваться, либо при величине статического напора в водопроводной сети, равной нулю, оставаться постоянным.

Исследовалась работа насосной группы (из двух насосов), ее энергетические показатели. Гидравлические характеристики водопроводной сети (без байпасирования, при байпасировании и при дросселировании), напорно-расходные характеристики насосной станции при частотном регулировании и без регулирования, полученные в результате численных исследований, представлены на рис. 2.

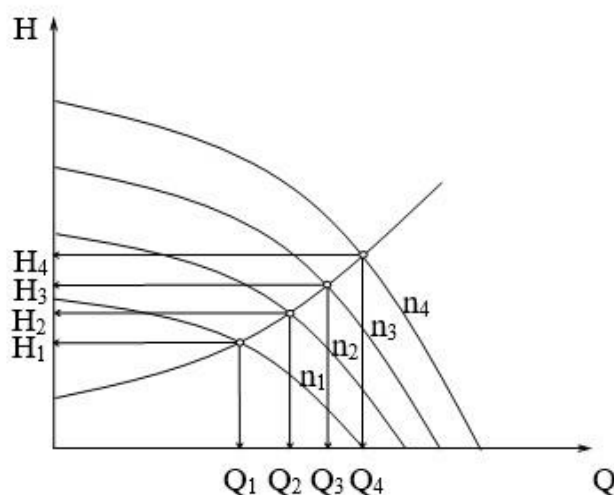


Рис. 1. Изменение параметров работы центробежного насоса при регулировании частоты вращения

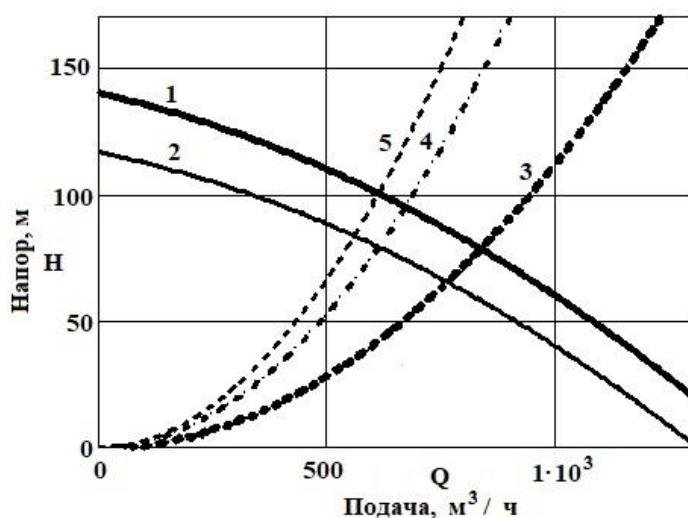


Рис. 2. Работа насосной группы (два насоса, работающих параллельно) на водопроводную сеть:

- 1 – характеристика насосной станции (регулировка частоты вращения отсутствует);
- 2 – характеристика насосной станции (при регулировке частоты вращения);
- 3 – гидравлическая характеристика водопроводной сети при байпасировании;
- 4 – гидравлическая характеристика водопроводной сети без байпасирования;
- 5 – гидравлическая характеристика водопроводной сети при дросселировании

Если частота вращения вала изменяется от n_0 до n , глубина регулирования определяется как отношение $n_p = n/n_0$. Численные исследования, представленные на рис. 2, выполнены при глубине регулирования, равной 0,9.

Мощность $N_p(Q)$ [8], удельный расход электрической энергии насосной группы $W(Q)$ и коэффициент полезного действия $KПД(Q)$ при NP параллельно работающих насосах определяли по уравнениям (1)–(3).

$$N_p(Q) = b_1 \cdot Q^2 \cdot n_p + b_2 \cdot Q n_p^2 + b_3 \cdot n_p^3; \quad (1)$$

$$W(Q) = NP \cdot N_p(Q) / Q; \quad (2)$$

$$KПД(Q) = c_1 \cdot Q^2 / n_p^2 + c_2 \cdot Q / n_p + c_3. \quad (3)$$

Коэффициенты полиномов в уравнениях (1) и (3) определяются по фактическим характеристикам (паспортным или полученным в результате испытаний).

В таблице приведены энергетические показатели исследуемой насосной группы из двух параллельно включенных насосов при различных режимах ее работы.

Таблица. Энергетические показатели исследуемой насосной группы из двух параллельно включенных насосов

Способ регулирования подачи	Мощность (кВт)	Расход электроэнергии (удельный) (кВт·ч/м³)	Коэффициент полезного действия
С регулированием частоты вращения (без байпасирования)	188,5	0,307	0,77
Без регулирования частоты вращения (с байпасированием)	286,1	0,466	0,707
Без регулирования частоты вращения (с дросселированием на нагнетательной линии)	233,7	0,381	0,769

Анализ представленных в таблице результатов показывает, что применение метода частотного регулирования дает экономию мощности на привод насосов более 34 % по сравнению с байпасированием и более 19 % по сравнению с дросселированием.

Экономию энергии от применения метода частотного регулирования (в течение периода времени Δt) рассчитывали по формулам:

- по сравнению с рециркуляцией

$$DNb(Q) = [NSb(Q) - NSn(Q)] \cdot \Delta t, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (4)$$

$$dNb(Q) = [NSb(Q) - NSn(Q)] / [0,001 \cdot NSb(Q)], \% \quad (5)$$

- по сравнению с дросселированием

$$DNd(Q) = [NSd(Q) - NSn(Q)] \cdot \Delta t, \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (6)$$

$$dNd(Q) = [NSd(Q) - NSn(Q)] / [0,001 \cdot NSd(Q)], \% \quad (7)$$

В уравнениях (4) – (7):

$NSb(Q)$ – мощность, потребляемая насосной станцией при байпасировании, кВт;

$NSd(Q)$ – мощность, потребляемая насосной станцией при дросселировании, кВт;

$NSn(Q)$ – мощность, потребляемая насосной станцией при изменении частоты вращения вала, кВт.

Проанализируем эффективность методов регулирования по насосным группам. Результаты расчета зависимостей энергетических показателей насосной станции от ее подачи при исследуемых способах регулирования представлены на рис. 3–5 ($NSb(Q)$ – регулирование байпасированием; $NSd(Q)$ – регулирование дросселированием; $NSn(Q)$ – частотное регулирование).

Анализ результатов, представленных на рис. 3, показывает, что с максимально возможной подачей насосная станция работает на сеть в случае, если задвижка на линии нагнетания полностью открыта, а на байпасной линии полностью закрыта. В этом случае уменьшать частоту вращения вала не требуется.

Как показано на верхней кривой рис. 3, мощность, потребляемая насосной станцией, не зависит от величины подачи потребителю, она постоянна. Данный случай имеет место, если насосы при байпасировании работают с постоянной подачей. При этом излишек воды через байпас направляется на всасывающую линию насосов. Таким образом, потребляемая мощность имеет одинаковую величину при регулировании байпасированием, регулировании дросселированием и частотном регулировании, т. е. при всех рассматриваемых способах регулирования.

Проведена оценка экономии электрической энергии от применения частотного регулирования по сравнению с иными способами регулирования. Результаты исследований представлены на рис. 4.

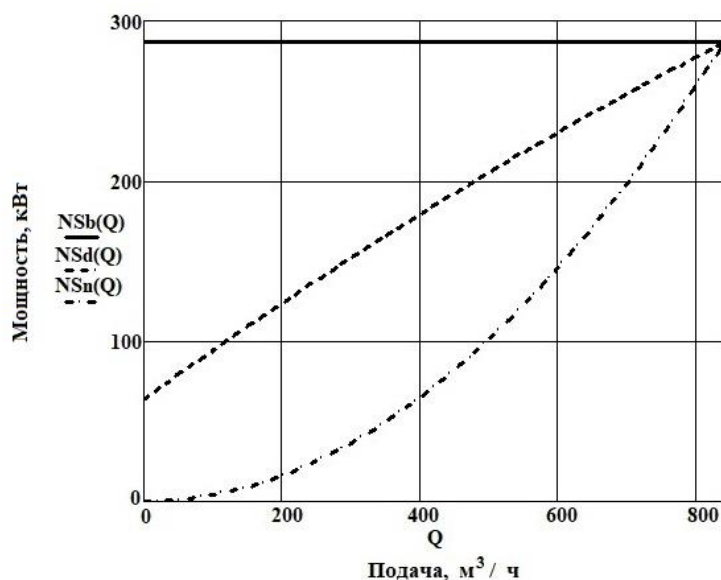


Рис. 3. Зависимость потребляемой мощности насосной станции от подачи воды в водопроводную сеть при разных режимах

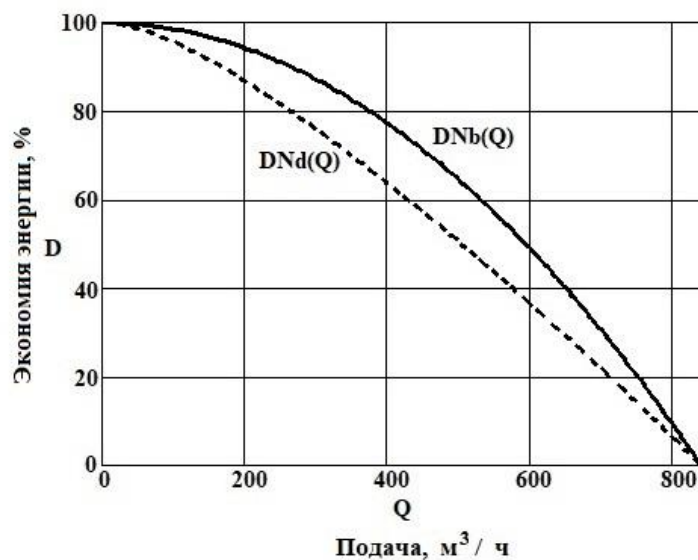


Рис. 4. Экономия электроэнергии при регулировании частотой вращения: режим работы с дросселированием $DNd(Q)$, с байпасированием $DNb(Q)$

Как показали исследования, чем регулирование глубже, т.е. чем меньше подача и неравномернее график водопотребления, тем больше эффект от применения метода частотного регулирования.

Результаты исследований зависимости удельного расхода электроэнергии от подачи насосной станции при частотном регулировании $W_n(Q)$, регулировании дросселированием $W_d(Q)$ и регулировании байпасированием $W_b(Q)$ представлены на рис. 5.

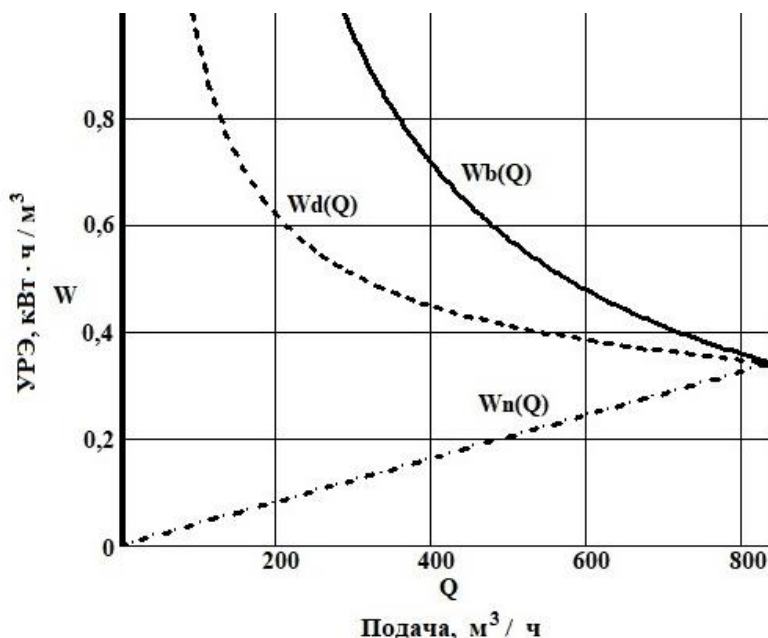


Рис. 5. Удельный расход потребляемой электрической энергии насосной станцией при различной подаче воды в сеть и разных способах регулирования

Для объекта защиты в качестве технологического критерия оптимальности рассмотрим удельный расход электроэнергии на привод насосов (УРЭ).

Мощность насоса

$$N = Q \cdot (\rho \cdot g \cdot H) / \eta, \quad (8)$$

где Q — подача насоса, м³/с;

H — напор насоса, м;

η — коэффициент полезного действия насоса;

ρ — плотность воды, кг/м³;

g — ускорение свободного падения, м/с².

Удельный расход электроэнергии

$$\begin{aligned} \text{УРЭ} &= H \cdot (\rho \cdot g / \eta), \text{ Дж/м}^3 = \\ &= H \cdot (\rho \cdot g / \eta) / (3600 \cdot 1000), \text{ кВт} \cdot \text{ч/м}^3. \end{aligned} \quad (9)$$

Если разницей величин КПД при дросселировании и применении частотного регулирования пренебречь, то снижение удельного расхода электроэнергии от применения частотного регулирования по сравнению с дросселированием составляет 30–70 %. Поскольку во многих случаях дросселирование приводит к уменьшению КПД, экономия может быть еще больше.

К дополнительному эффекту по экономии электроэнергии может привести повышение качества процесса регулирования, обусловленного использованием качественной, адекватной и информативной модели насосной группы.

В работе [9] отмечено, что одной из проблем при аналитическом описании и исследовании работы многонасосных групп является изменение в процессе эксплуатации фактических характеристик насосов, обусловленных их износом и некачественным обслуживанием. Следует отметить, что при этом различные рабочие характеристики (зависимости напора, мощности и КПД от подачи) могут быть у работающих совместно насосов даже одной марки. В связи с этим постоянное уточнение зависимостей, которые описывают эти характеристики, в соответствии с фактическим состоянием насосных агрегатов, может быть реализована в процессе мониторинга параметров работы многонасосных групп. Это позволит в процессе оптимизации работы насосных групп максимально использовать агрегаты с наиболее «высокими» характеристиками, а также повысить точность расчетов необходимой частоты вращения.

Предлагаемая модель насосных групп может быть использована для оптимизации по экономическому критерию. При частотном регулировании подачи насосов «регулирующий» объем напорно-регулирующих емкостей практически равен нулю и эти «высвобождаемые» объемы можно использовать в процессе оптимизации суточного графика работы насосной

группы. Другой пример оптимизации многонасосной группы - принятие решений о полной (частичной) замене оборудования на основе накопленного статистического материала о графиках водопотребления или в случае предполагаемого расширения многонасосной группы при появлении дополнительных водопотребителей.

Список литературы

1. Жучков В. В. Противопожарное водоснабжение. М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 298 с.

2. Аверьянов А. О. Общие схемы и способы регулирования работы насосов при повышении напора // Молодой ученый. 2023. № 3 (450). С. 68–71.

3. Мрочек В. И., Мрочек Т. В., Бураков А. С. Исследование центробежных насосов и способов регулирования их подачи // Вестник Белорусско-Российского университета. 2012. № 2. С. 50–56.

4. Кожухова А. В., Рамазанов К. Н. Применение ЧРП для повышения энергоэффективности насосной установки // Символ науки. 2016. № 11–3. С. 95–97.

5. Multiobjective Optimization of Low-Specific-Speed Multistage Pumps by Using Matrix Analysis and CFD Method / Qiaorui Si, Shouqi Yuan, Jianping Yuan [et al.]. J. Appl. Math. Volume 2013. 10 p.

6. Annusa I., Uibob D., Koppela T. Pumps energy consumption based on new EU legislation. Procedia Engineering, 2014, vol. 89, pp. 517–524.

7. Лысенко О. А., Кузнецов Е. М. Энергоэффективные режимы работы установок центробежных насосов // Вестник Югорского государственного университета. 2012. № 2 (25). С. 79–86.

8. Бубнов В. Б., Репин Д. С. Математическое описание рабочих характеристик насосов в противопожарном водоснабжении при различных способах регулирования // Современные проблемы гражданской защиты. 2025. № 2 (55). С. 24–32.

9. Бубнов В. Б., Репин Д. С. Анализ практики эксплуатации групп совместно работающих насосов в противопожарном водоснабжении и подходов к аналитическому описанию их характеристик // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 55–61.

2. Averyanov A. O. Obshchiye skhemy i sposoby regulirovaniya raboty nasosov pri povyshenii napora [General schemes and methods for regulating the operation of pumps with increasing pressure]. *Molodoy uchenyy*, 2023, vol. 3 (450), pp. 68–71.

3. Mrochek V. I., Mrochek T. V., Burakov A. S. Issledovaniye tsentrobezhnykh nasosov i sposobov regulirovaniya ikh podachi [Research of centrifugal pumps and methods of regulating their feed]. *Vestnik Belorussko-Rossiyskogo universiteta*, 2012, issue 2, pp. 50–56.

4. Kozhukhova A. V., Ramazanov K. N. Primeneniye CHRP dlya povysheniya energoeffektivnosti nasosnoy ustanovki [Application of VFD to improve the energy efficiency of a pumping unit]. *Simvol nauki*, 2016, issue 11–3, pp. 95–97.

5. Multiobjective Optimization of Low-Specific-Speed Multistage Pumps by Using Matrix Analysis and CFD Method / Qiaorui Si, Shouqi Yuan, Jianping Yuan [et al.]. *J. Appl. Math.* Volume 2013. 10 p.

6. Annusa I., Uibob D., Koppela T. Pumps energy consumption based on new EU legislation. *Procedia Engineering*, 2014, vol. 89, pp. 517–524.

7. Lysenko O. A., Kuznetsov Ye. M. Energoeffektivnyye rezhimy raboty ustanovok tsentrobezhnykh nasosov [Energy-efficient operating modes of centrifugal pump units]. *Vestnik Yugorskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2012, vol. 2 (25), pp. 79–86.

8. Bubnov V. B., Repin D. S. Matematicheskoye opisaniye rabochikh kharakteristik nasosov v protivopozharnom vodosnabzhenii pri razlichnykh sposobakh regulirovaniya [Mathematical description of the operating characteristics of pumps in fire-fighting water supply with various control methods]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2025, vol. 2 (55), pp. 24–32.

9. Bubnov V. B., Repin D. S. Analiz praktiki ekspluatatsii grupp sovместno rabotayushchikh nasosov v protivopozharnom vodosnabzhenii i podkhodov k analiticheskomu opisaniiu ikh kharakteristik [Analysis of the practice of operating groups of jointly operating pumps in fire water supply and approaches to the analytical description of their characteristics]. *Sovremennyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2023, vol. 3 (48), pp. 55–61.

References

1. Zhuchkov V.V. *Protivopozharnoye vodosnabzheniye* [Fire water supply]. Moscow: Akademija GPS MChS Rossii, 2016. 298 p.

Бубнов Владимир Борисович

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

кандидат технических наук, доцент

E-mail: kafppv@mail.ru

Bubnov Vladimir Borisovich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: kafppv@mail.ru

Репин Денис Сергеевич

Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России,

Российская Федерация, г. Иваново

преподаватель

E-mail: denisrep@mail.ru

Repin Denis Sergeevich

Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters»,

Russian Federation, Ivanovo

teacher

E-mail: denisrep@mail.ru